

基于图像角点特征的第二代水印算法研究

杨娟^{1,3)} 杨丹²⁾ 张小洪²⁾

¹⁾(重庆大学计算机学院,重庆 400030) ²⁾(重庆大学软件学院,重庆 400030)

³⁾(中国人民解放军重庆通信学院,重庆 400035)

摘要 提出了一种新颖的基于图像角点特征的第2代水印算法。该方法首先将水印图像进行置乱预处理,其次对载体图像进行小波3级提升,然后利用第2步的结果和多尺度曲率积角点检测(MSP)方法,提取出图像最低频成分中的角点,最后在角点位置对应的所有高频系数中嵌入水印。检测时,在这些系数上做水印嵌入的逆运算,并用事先得到的密钥反变换出水印。实验结果表明,所提出的水印算法较第1代数字水印算法不仅在运行速度上大大提高,而且在抵抗旋转、放缩、平移、裁剪等几何攻击方面的鲁棒性也有显著提高。

关键词 数字水印 提升小波 角点 鲁棒性 几何攻击 图像置乱

中图法分类号: TP391 文献标识码: A 文章编号: 1006-8961(2009)05-884-07

Research on Second Generation Watermarking Algorithm Based on Image Corner Feature

YANG Juan^{1,3)}, YANG Dan²⁾, ZHANG Xiao-hong²⁾

¹⁾(College of Computer Science of Chongqing University Chongqing 400030) ²⁾(The School of Software Engineering,

Chongqing University, Chongqing 400030) ³⁾(PLA Chongqing Communication College, Chongqing 400035)

Abstract In this paper, a novel second generation watermarking algorithm based on image corner feature is proposed. Firstly, the watermark image is scrambled by using Arnold transformation. Secondly, wavelet transformation based three-level lifting for the carrier image is conducted. Thirdly, utilized the outcome of second step and MSP method, corners are detected from the low frequency components. Finally, by taking corners as root nodes, all the corresponding high frequency coefficients are extracted. Inverse operation of embedding watermark is performed with those coefficients. And using the given key, the watermark can be obtained. Sufficient experiments demonstrate the robustness of this approach, especially in resisting geometry attack such as RST (Rotation, Scaling and translation) and cut attack.

Keywords digital watermarking, lifting-based wavelet, image corner feature, robust, geometry attack, image scrambling,

1 引言

数字水印作为一种数据认证和版权保护的手段,必然会受到各种形式的攻击,因此,抵抗各种无意或恶意攻击的稳健性是水印系统的一项基本要求。而在各种攻击中,抗几何攻击是十分困难而极具挑战性的课题。

目前,抵抗几何攻击的算法大致可以分为4类^[1-4]:

第1类算法是将水印嵌入到几何不变量中。第2类是在图像中除嵌入水印外还嵌入一个模板用于抵抗几何攻击。第3类是将水印以一个可识别的结构嵌入到载体数据中。第4类是应用数据的重要特征来嵌入水印信息,这就是所谓的第2代数字水印。综合目前抗几何攻击的水印算法可以看出,通过采

收稿日期:2007-06-11;改回日期:2007-09-20

第一作者简介:杨娟(1971~),女,讲师。重庆大学计算机科学与技术专业博士研究生。主要研究方向为数字图像处理,数字水印技术。E-mail:yajj6688@yahoo.com.cn

用 Fourier-Mellin 变换来构造几何不变特征、隐藏几何校正模型等,为解决抗旋转、伸缩、平移(RST)问题提供了可能的方法。但是,还存在着一些问题:(1)目前许多抗 RST 的算法只是在一定程度上解决了随机序列水印的问题,有意义水印抗几何攻击的问题仍然没有得到很好地解决;(2)抗大范围裁剪、线性变换、Random bend 的稳健性尚未得到解决;(3)目前变换域算法多集中于离散傅里叶变换(DFT)域,它们因与新的图像压缩标准不兼容而限制了其应用。

而相对于其他的抗几何攻击的方法,第2代数字水印有比较好的性能和较大的发展空间^[5]。在这种方法中,水印的嵌入位置是由图像的特征决定的,与图像相应的坐标没有关系,又因为图像的特征对几何变换是不变的,所以可以抵抗几何攻击。

本文提出了一个基于图像角点特征的数字水印算法,即通常被称为的第2代数字水印算法^[5]。该算法采用基于多尺度曲率积的鲁棒特征点——角点检测。首先将载体图像进行3级小波提升,尔后在近似子图 $LL_{3,3}$ 中提取角点,为兼顾水印的鲁棒性和不可见性,将检测到的角点作为根节点,在其对应的各级高频系数中嵌入水印。实验结果表明,该算法具有速度快,可以有效抵抗 RST 和裁剪等几何攻击的优点。

2 提取图像的多尺度曲率积(MSP)角点特征

角点是图像的重要特征信息之一^[6]。如何选择角点是一个好的水印嵌入方案的关键。如果角点在经过对图像无意或者恶意的操作后仍能提取出来,则水印参考点的信息就可以得到,水印就能提取出来。

MSP 角点检测技术^[6]的主要思想是,在曲率尺度空间(CSS)框架下提出了多尺度乘积的角点检测技术。曲率尺度积函数被定义为各个尺度下轮廓曲率的乘积,而角点被定义为曲率乘积的局部极大值点。尺度积能显著地增强角点曲率极值点的峰值,同时抑制噪声影响,而且不改变角点的位置。利用尺度空间的因果性,将轮廓在不同尺度下的角度的变化率做乘积运算,由于噪声在大尺度下会被迅速减弱,而真正的角点处的角度的变化率会因为乘积而增大,故这种方法可以很好地检测出角点,且保持

了角点的位置和对噪声良好的鲁棒性。MSP 算法具备如下优点:(1)能够检测出尽量多的正确角点,同时又只有少量错误角点产生,即具备较高的检测率;(2)拥有良好的重复率,在图像发生变换的情况下也能检测出大量的正确角点;(3)对噪声的鲁棒性较强;(4)具有较高的效率。

采用文献[6]的方法来提取角点:

将曲线 Γ 写成以弧长 u 为参数的函数形式:

$$\Gamma(u) = (x(u), y(u)) \quad (1)$$

根据 CSS 的多尺度思想,设 $\Gamma(u, \sigma)$ 表示曲线 Γ 在尺度 σ 下的参数形式,即

$$\Gamma(u, \sigma) = (X(u, \sigma), Y(u, \sigma)) \quad (2)$$

式中,

$$\begin{aligned} X(u, \sigma) &= x(u) \otimes g(u, \sigma) \\ Y(u, \sigma) &= y(u) \otimes g(u, \sigma) \end{aligned} \quad (3)$$

其中, \otimes 是卷积算子, $g(u, \sigma)$ 是尺度 σ 下的高斯函数。

那么曲线 $\Gamma(u, \sigma)$ 的曲率定义如下:

$$k(u, \sigma) = \frac{X_u(u, \sigma)Y_{uu}(u, \sigma) - X_{uu}(u, \sigma)Y_u(u, \sigma)}{(X_u(u, \sigma)^2 + Y_u(u, \sigma)^2)^{1.5}} \quad (4)$$

式中,

$$\begin{aligned} X_u(u, \sigma) &= \frac{\partial}{\partial u}(x(u) \otimes g(u, \sigma)) \\ &= x(u) \otimes g_u(u, \sigma) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} X_{uu}(u, \sigma) &= \frac{\partial^2}{\partial u^2}(x(u) \otimes g(u, \sigma)) \\ &= x(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma) \end{aligned} \quad (6)$$

$$Y_u(u, \sigma) = y(u) \otimes g_u(u, \sigma) \quad (7)$$

$$Y_{uu}(u, \sigma) = y(u) \otimes g_{uu}(u, \sigma) \quad (7)$$

其中, $g_u(u, \sigma)$, $g_{uu}(u, \sigma)$ 分别表示 $g(u, \sigma)$ 的关于 u 的一阶和二阶导数。

设 $g(u, \sigma_j)$ 表示高斯函数 $g(u)$ 在尺度 σ_j 下的形式,则 $g(u, \sigma_j) = \frac{1}{\sigma_j \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{u^2}{2\sigma_j^2}}$ ($j=1, 2, \dots$)。根据式(4)~式(7),可以计算在第 j 尺度下 $\Gamma(u, \sigma_j)$ 的曲率,则多尺度曲率积为

$$P_z(u) = \prod_{j=1}^z k(u, \sigma_j) \quad (8)$$

一般来说,任意几个尺度下的曲率乘积可以由

$$P(u) = \prod_{j \in Z} k(u, \sigma_j) \quad (9)$$

来表示,其中 \mathbf{Z} 为一个整数集合。

由此,得到一个简单、有效的角点检测器。角点检测器将 $|P(u)|$ 的大于某个阈值的局部极大值点作为角点。如图 1 所示,为 MSP 算法对不同图像取不同参数时获得的检测效果。



图 1 MSP 算法取不同参数时获得的检测效果

Fig. 1 Detecting effect of the MSP algorithm in different parameters

3 提升小波实现快速多分辨率分解原理及水印图像的预处理

3.1 提升小波实现快速多分辨率分解原理

提升方案小波变换是由 Sweldens 等人于 20 世纪 90 年代提出的,其特点是运算速度快,允许完全原位计算。并且小波变换的逆变换是真正意义上的正变换的反运算。提升算法小波的正向提升过程可分解成 3 个部分:切分 (split)、预测 (predict) 和更新 (update)^[7]

(1)切分是指把原始信号切分成不相交的两个子集,实际应用中通常将原始信号切分成偶数样本和奇数样本;

(2)预测是指采用预测算子,根据偶数样本预测奇数样本,其误差称为小波系数;

(3)更新是指对小波系数施加更新算子,然后加上奇数样本得到相应的尺度系数,从而得出在较低分辨率上对原始信号的一种逼近。

类似于一代小波变换,对尺度系数反复进行正向提升过程即可得到离散小波变换尺度系数和小波系数的完备集合。图 2 给出了正向提升算法和逆向提升算法过程。

提升算法的正向变换公式为

$$\begin{aligned} (s_e, s_o) &= S(s) \\ \gamma &= s_o - P(s_e) \end{aligned}$$

$$\lambda = s_e + U(\gamma)$$

式中, S 表示将原始信号进行切分, S_e 表示信号的偶数样本, S_o 表示信号的奇数样本, P 、 U 为预测算子和修正算子; γ 、 λ 在小波的多分辨率分析中被称之为小波系数和尺度系数。提升方法的实现步骤如图 2 的左半部分所示。

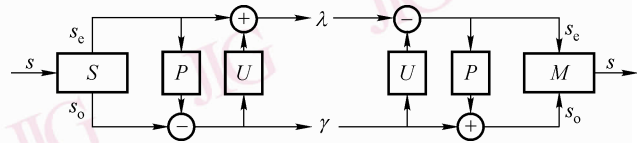


图 2 正向提升算法和逆向提升算法

Fig. 2 Forward lifting algorithm and reverse lifting algorithm

如果得到了正向变换,就可得到逆向变换,这只需改变前向变换公式中的加减符号即可得到,如图 2 的右半部分所示,这是提升方法的又一个特点。逆向变换的公式如下:

$$\begin{aligned} s_o &= \gamma + P(s_e) \\ s_e &= \lambda - U(\lambda) \\ s &= M(s_e, s_o) \end{aligned}$$

式中, M 表示将信号 S_e 、 S_o 进行融合。

实现提升方法的关键是寻找合理的预测算子和修正算子。

为检验提升方案的快速性,分别对一代小波中的 Haar, Db2, Db4, 9/7 小波进行提升,发现小波经提升后处理时间大大节省。Haar 小波处理时间节省 47.56%, Db2 小波处理时间节省 39.44%, Db4 小波处理时间节省 12.28%, 9/7 小波处理时间节省 29.63%, 尤其 Haar 小波经提升后处理时间节省近 50%。

3.2 水印图像的预处理

为增强含水印图像的抗攻击性能,本文基于下述思想将水印信息进行了预处理,如果能够利用某种算法将水印信息扰乱,得到一幅杂乱无章的图像,那么即使盗取者得到它,如果不知道如何扰乱的密钥,所盗取的图像对他来说也是毫无意义。同时,对水印的置乱处理可以消除水印像素的空间相关性,进而提高水印抗图像裁剪的鲁棒性^[8]。考虑到算法简单及计算花费少的原因,本文将 Arnold 变换作为进行水印预处理的工具。

利用 n 次置乱度的计算公式^[8]

$$A_n = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n a_k \frac{E(D_k(i,j))}{\text{Var}(D_k(i,j))} \quad (10)$$

式中, $D_k(i, j)$ 为水印图像相距 k 个元素之间的欧式距离, a_k 为加权系数, 体现了不同距离在置乱系数中所起的作用。在不同的图像中根据实际情况可取不同的加权系数。

由式 (10), 计算图像的置乱程度问题, 就转化为对不同阶数 $N \times M$ 的矩阵在约束条件下计算出经过多少次 Arnold 变换, 置乱系数可得到最大值的规划问题, 亦即图像可以达到最乱。此时图像的鲁棒性最强。此算法很容易编程实现。

将阶数为 196×210 的 Key 矩阵经过 1 至 20 次 Arnold 变换, 从图 3 可看出阶数为 196×210 的矩阵在经过 13 次 Arnold 变换后达到最乱。这和计算结果也是相吻合的。这里 13 将作为水印嵌入的密钥。

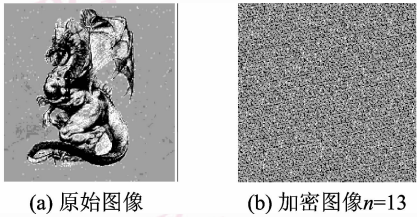


图 3 Key 原图及 Arnold 变换后的图像
Fig. 3 Original image of Key and Arnold transformation image of Key

4 基于图像角点特征的数字水印算法

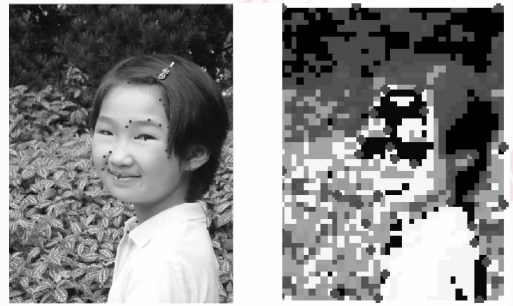
4.1 水印嵌入和检测算法

本文提出一种基于提升方案小波的第 2 代水印算法。首先对原图做 3 级小波提升变换, 最低频成分是图像的粗尺度 (低分辨率) 逼近, 从中提取出图像的角点。由于最低频成分数据量比原始图像小^[7,9], 因此, 可以降低角点提取所需的计算量。如图 4 分别检测出 149 个角点和 34 个角点。然后在角点对应的所有高频系数中嵌入预处理后的水印, 兼顾水印的不可见性和鲁棒性要求^[10-11]。

水印检测不需要原始水印, 为盲检测。利用阈值检验水印是否存在。实验结果证明, 该算法对抗几何变换和裁剪攻击具有较好的鲁棒性。

水印嵌入算法 算法框图如图 5(a) 所示, 具体步骤如下:

- (1) 对载体图像进行 9/7 小波 3 级提升分解变换, 得到若干个近似子带子图 $LL_{i,3}, i = 1 \cdots n$;
- (2) 对 $LL_{3,3}$ 提取 MSP 角点;



检测出 149 个角点 检测出 34 个角点

图 4 MSP 算法在不同分辨率下的检测效果
Fig. 4 Detecting effect of MSP at different scales

(3) 将水印图像进行置乱, 并生成随机序列集 $X, x \in X, x_i$ 为其中任意子序列集 x 中的元素, 为服从 $N(0, 1)$ 标准正态分布的随机数;

(4) 如果 $LL_{3,3}(x, y)$ 是一个角点, 则在生成树 $tree(LL_{3,3}(x, y))$ 中除根节点 (最低分辨率逼近) 外的所有节点 (各个方向上的高频系数) 中嵌入水印。水印的加入采用下面方式:

$$\forall w_i \in tree(LL_{3,3}(x, y)), \hat{w}_i \leftarrow w_i + \alpha x_i$$

式中, w_i 为原始子图高频系数, \hat{w}_i 为嵌入水印后子图高频系数, α 为水印嵌入强度, 本文中取 $\alpha = 0.45$ 。

(5) 将经过运算后的子频带信息进行 3 级小波逆变换合成得到嵌入水印后得到含水印图像。

水印检测算法 总体上是水印嵌入的逆过程, 算法框图如图 5(b) 所示, 具体步骤如下:

- (1) 对待测图像进行 9/7 小波 3 级提升分解变换, 得到若干个近似子带子图 $LL_{i,3}, i = 1 \cdots n$;
- (2) 对 $LL_{3,3}$ 提取 MSP 角点, 并提取出角点对应的所有含水印信息的高频系数 \hat{w}_i ;
- (3) 对提取出的系数 \hat{w}_i 做水印加法逆运算

$$x_i = \frac{\hat{w}_i - w_i}{\alpha}$$

(4) 将 x_i 与阈值比较, 判断是否存在水印, 如判断为是, 则将其排序, 重置为矩阵, 并进行置乱处理的逆运算, 即可获得所提取的水印图像。

(5) 将所提取水印信号与原始水印信号通过计算归一化互相关函数 f 和峰值信噪比 (PSNR) 来度量水印算法的鲁棒性和透明性。

4.2 仿真试验及结果分析

为检测本算法中水印抗几何攻击的鲁棒性, 分别对含水印图像进行了旋转、缩放和裁减等几何攻击。如图 6 所示。实验表明, 经 3 种攻击后, 在待测

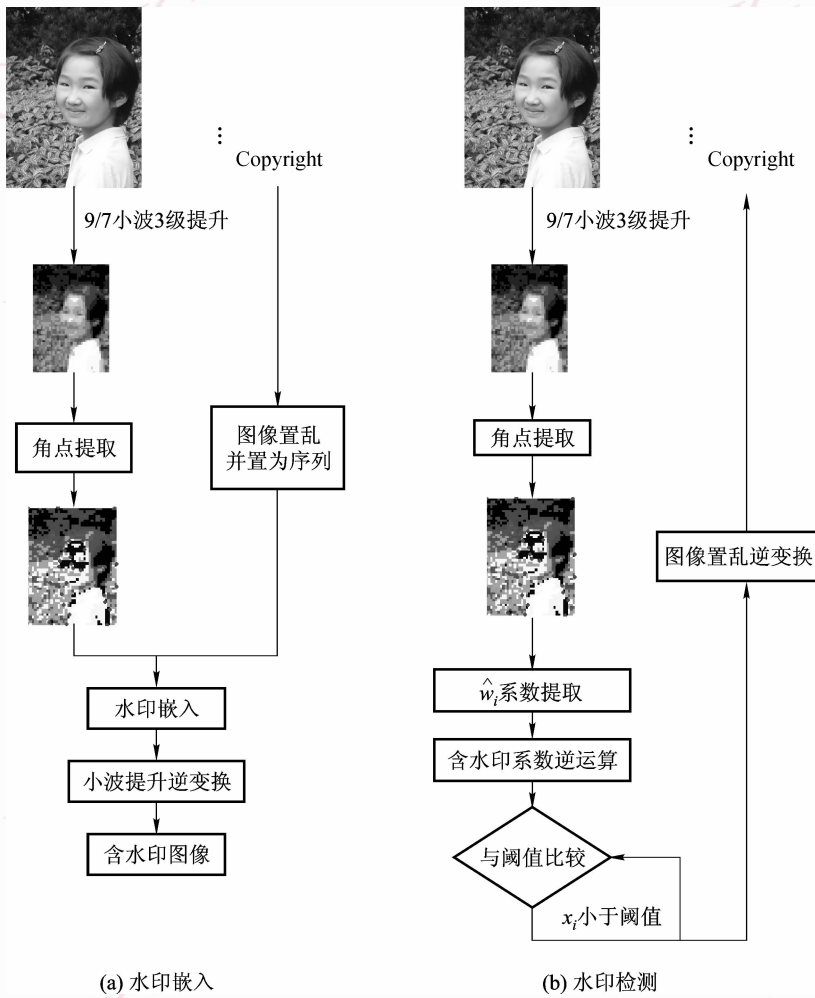


图 5 水印嵌入和水印检测的算法框图

Fig. 5 Flow charts of watermarking embedment algorithm and extraction algorithm



(a) 含水印图像 (b) 缩小40%后含水印图像 (c) 放大60%后含水印图像 (d) 旋转40度后含水印图像 (e) 裁剪50%后含水印图像

图 6 含水印图像和经缩放、旋转、裁剪攻击后的含水印图像

Fig. 6 Watermarking image and watermarking image under resized, rotated and cropped



图 7 本文算法与经典算法含水印图像效果比较

Fig. 7 Comparing effect of watermarking images of our algorithm and DCT, DWT algorithm

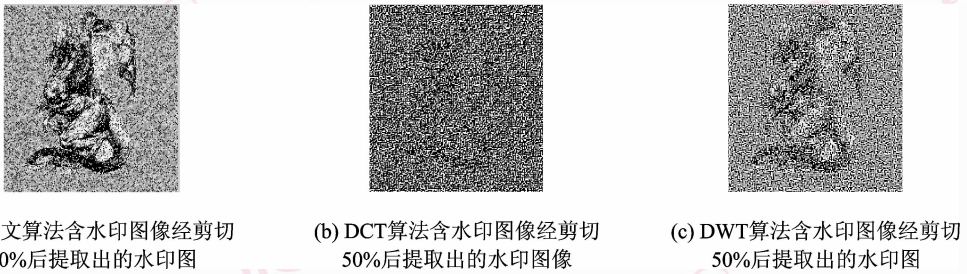


图 8 3 种算法经剪切攻击提取水印效果比较图

Fig. 8 Comparing effect of recovered watermarks in this algorithm and DCT, DWT algorithm under cropped

图像的角点都能准确检测出水印,只是在裁剪攻击中,检测到的水印效果较差,但仍能分辨出水印图像。实验证明本算法中水印对 3 种攻击都有较强的鲁棒性。同时,将本文算法和经典的 DCT (discrete cosine transform) 和 DWT (discrete wavelet transform) 算法做了对比实验,实验证明,本文算法较 DCT 和 DWT 算法有很强的鲁棒性。如表 1、图 7 和图 8 所示。表 1 是图像经过各种攻击后与经典 DCT 和 DWT 算法相比较的实验结果数据。数据表明,信噪比和相关函数值均有较大提高,这说明本文算法具有较好的鲁棒性;从图 7 可以看出,用本算法嵌入的水印其不可见性即透明性明显高于其他两种算法;从图 8 可以看出,用本算法嵌入的水印抵抗恶意裁剪攻击的能力也明显高于其他两种算法。

最后,将本算法分别用 4 种滤波器 Haar、Db2、Db4、9/7 做了对比实验,其峰值信噪比均在 47 以上,远远超过通用的 40 以上的标准,如表 2 所示,可以看出,本文算法在兼顾水印的透明性和鲁棒性方面具有较大优势。

表 1 本文算法和 DWT 变换算法抗攻击能力比较(9/7 小波)

Tab. 1 Attack-resistant Comparing of our algorithm and DWT

	R_{PSNR} (dB)			f_c		
	本文算法	DCT	DWT	本文算法	DCT	DWT
未攻击	47.637 9	32.773 7	29.389	1	0.697	0.667
旋转攻击	34.548	18.223	20.785	0.756 7	0.508	0.499
裁剪攻击	38.878	14.31	10.074	0.710 0	0.613	0.569
放缩攻击	39.404	28.714	22.728	0.752 5	0.541	0.607

表 2 4 种滤波器嵌入水印时间及 R_{PSNR} 比较

Tab. 2 Comparing of embedded time and R_{PSNR} of our algorithm

小波	3 级小波提升变换	
	时间 (s)	R_{PSNR} (dB)
Haar	0.234 0	49.297 5
Db2	0.281 0	47.083 2
Db4	0.375 0	47.251 5
9/7	0.381 0	47.637 9

5 结 论

本文提出了一种基于小波提升和多尺度曲率积角点检测的抗旋转、平移、缩放和裁剪的第 2 代数字图像水印算法。水印信号的检测过程不需要原始图像。为检测水印抗几何攻击的鲁棒性,实验中采用了旋转、平移、缩放和裁剪等常见的几何攻击。实验结果表明,该方法对上述几何攻击,尤其是裁剪攻击较第 1 代数字水印算法具有较好的鲁棒性,这对解决水印图像对抗几何攻击尤其是裁剪的鲁棒性差的问题有极大帮助。本算法有待改进之处是嵌入水印信息的容量不够大。如何提高嵌入水印信息的容量,同时兼顾到不影响水印的透明性,这将是下一步研究的重要方向。

参考文献 (References)

- 1 Lin C Y, Bloom J A, Cox I J, *et al.* Rotation-, scale-, and translation-resilient public watermarking of images [J]. Proceedings of SPIE, 2000, **3971**(2): 90-98.
- 2 Ahmed A M, Day D D. A novel method to generate the mask for data hiding and image watermarking [A]. In: Proceedings of IASTED International Conference on Signal and Image Processing [C], Honolulu, Hawaii, USA, 2003: 204-218.
- 3 Schyndel R G, Tirke A I, Osborne C. A digital watermark [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Austin, Texas, USA, 1994: 86-90.
- 4 Piva A, Barni M, Bartolini F, *et al.* DCT-based watermark recovering without resorting to the uncorrupted original image [A]. In: Proceedings of IEEE International Conference on Image Processing [C], Santa Barbara, CA, USA, 1997: 520-523.
- 5 Solachidis V, Pitas I. Circularly symmetric watermark embedding in 2-D DFT domain [J]. IEEE Transactions on Image Process, 2001, **10**(11): 1741-1753.
- 6 Zhang Xiao-hong, Lei Ming, Yang Dan. Multi-scale curvature product for robust image corner detection in curvature scale space [J]. Pattern Recognition Letters, 2007, **5**(28): 545-554.
- 7 Yarlagadda R, Hershey J. A naturalness-preserving transform for image coding and reconstruction [J]. IEEE Transactions on Acoust Speech Signal Process, 1985, **33**(4): 1005-1012.
- 8 Shang Yan-hong. Reserch on Image Encryption Techniques [D]. Beijing: The Master Degree Paper of North China University of Technology, 2005: 137-149. [商艳红. 数字图像加密技术研究 [D]. 北京: 北方工业大学硕士学位论文, 2005]
- 9 Hall E L. Computer Image Processing and Recognition [M]. New York, NY, USA: Academic Press, 1979: 793-809.
- 10 Bracewell R N. The Hartley Transform [M]. New York, NY, USA: Oxford University Press, 1986: 132-167.
- 11 Osinubi A O, King R A. One-dimensional Hadamard naturalness-preserving transform reconstruction of signals degraded by nonstationary noise processes [J]. IEEE Transactions on Signal Process, 1992, **40**(3): 645-659.